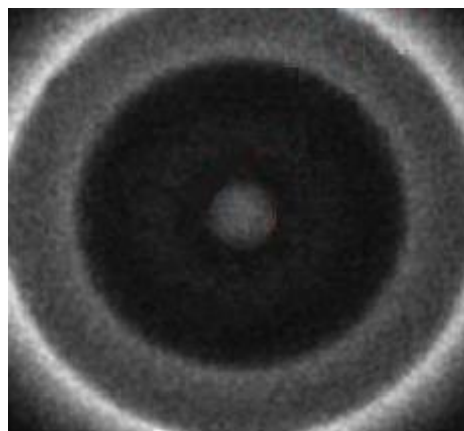
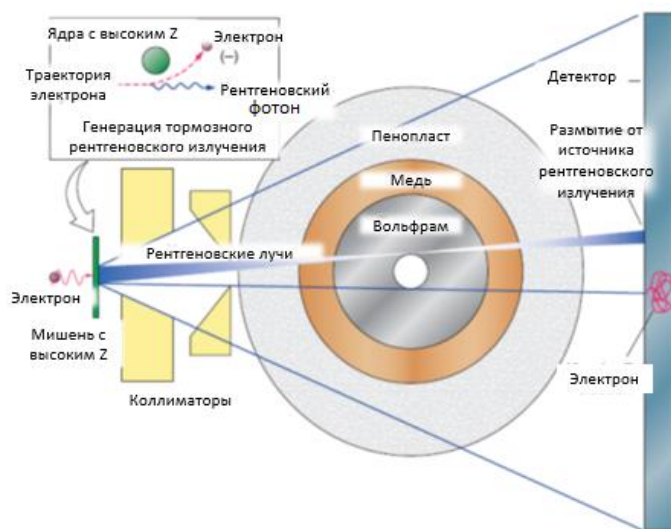


Многоканальный высокоэффективный детектор для проведения рентгенографических исследований

Григорьев Д.Н.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИЯФ СО РАН)

Принцип рентгенографии



* Cunningham G. S.,
Morris C.
Flash Radiography.
"Historical Origins."
(2003)

Для просвечивания объектов с высокой рентгеновской плотностью (эквивалент в сотни миллиметров стали) используются гамма кванты с энергией 2-6 МэВ. В случае просвечивания объектов с высоким атомным номером (вольфрам, свинец и так далее) прошедшее через объект гамма излучение квазимонохроматично с энергией ~4 МэВ.

Начало рентгенографии

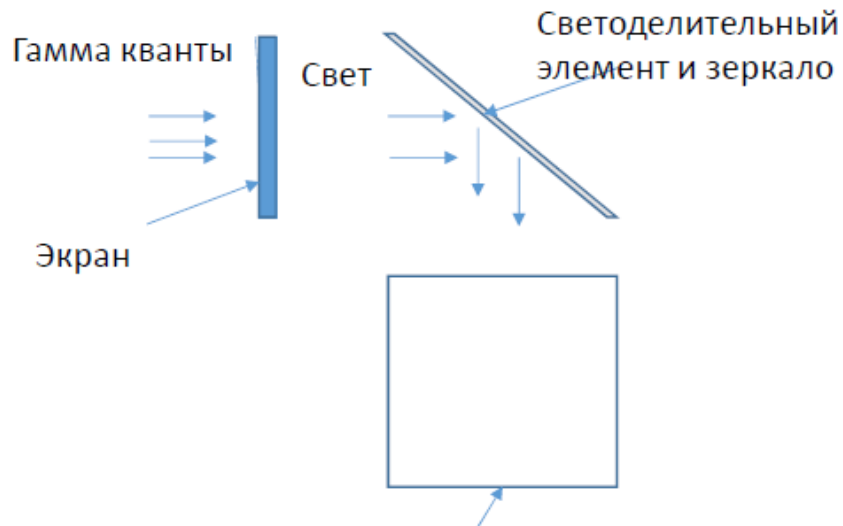
- Используя разницу в плотности костей и мягких тканей Вильям Рентген 23 января 1896 г. сделал первый рентгеновский снимок: руки биолога профессора Альберта фон Келликера (первая нобелевская премия по физике, 1901)



- В течении ~100 лет основным методом регистрации была пленка, сначала фотографическая, потом рентгеновская.
- Эффективность с усиливающими экранами достигла ~1%. Иногда для увеличения эффективности собирают в стопки по 10-20 слоев.
- Принципиальное ограничение: 1 импульс
- Появившиеся в конце XX века запоминающие экраны облегчили работу, но не изменили суть метода.

Развитие матричных фотоприемников позволило создать многокадровые системы

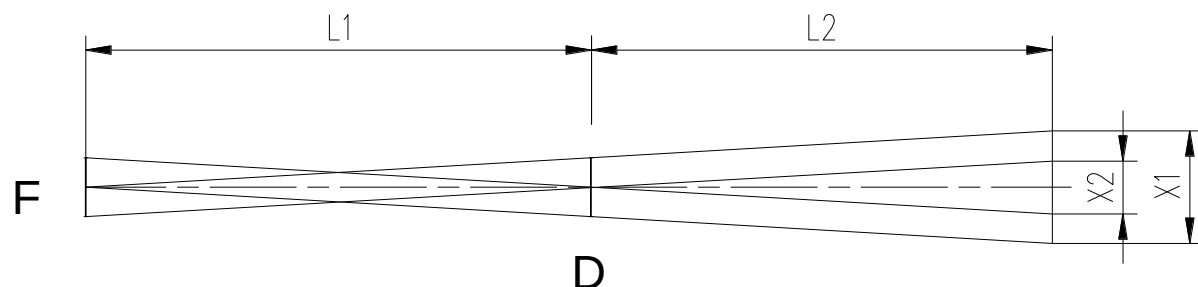
Свет с экрана (тяжелый
сцинтиллятор) подается
на несколько систем
оптика+МФП (каждая
система измеряет 1 кадр)



Системы из объективов и матричных фотоприемников

- Даже при со спец. объективами все определяется низким сбором световых фотонов, $\ll 1$ фотон/γ.
- Просвечивающая способность задана шумами МФП.
- Динамический диапазон ~ тысяч.
- ЭОП – фактически ДА-НЕТ информация.

Влияние размера фокусного пятна



на рисунке

$$F=D$$

$$L_1=L_2$$

- Связанный с разрешением размер $X_1=D(L_2/L_1+1)$ (D -разрешаемый элемент)
- Размытие из-за фокусного пятна $X_2=F*L_2/L_1$
- Если $F>D$ – для обеспечения разрешения детектор как можно ближе к объекту.
- Если $F\leq D$ – можно использовать проекционную геометрию с увеличением.

Параметры существующих комплексов с большой просвечивающей способностью

1. Энергия электронов 20-60 МэВ.
2. Токи электронов порядка 10^2 - 10^3 А.
3. Большое фокусное пятно (несколько миллиметров) – для обеспечения координатного разрешения на объекте детекторы должны располагаться максимально близко к объекту и иметь избыточное собственное разрешение. Описанные выше методы регистрации удовлетворяют этим требованиям.

ЛИУ-20

- Энергия 20 МэВ (оптимальна)
- Ток 2 кА (увеличение просвечивающей способности)
- Длительность импульса до 500 нс – (можно сделать 9 ракурсов).
- **Фокусное пятно <1 мм (возможность использовать более чувствительные детекторные технологии).**

Детектор для ЛИУ-20

- Малое фокусное пятно позволяет использовать увеличение в несколько раз и, следовательно, применить развитые в физике элементарных частиц методы регистрации.
- **Что и было сделано.**

Детектор для ЛИУ-20

- **Задача:**
- Регистрация 3 последовательных импульсов с интервалами 2-20 мкс.
- Максимальная чувствительность для обеспечения регистрации минимального потока гамма квантов не более 200.
- Диапазон регистрируемых потоков гамма квантов не менее 10^4 .
- Координатное разрешение на объекте (с учетом проекционного соотношения) ≤ 1 мм

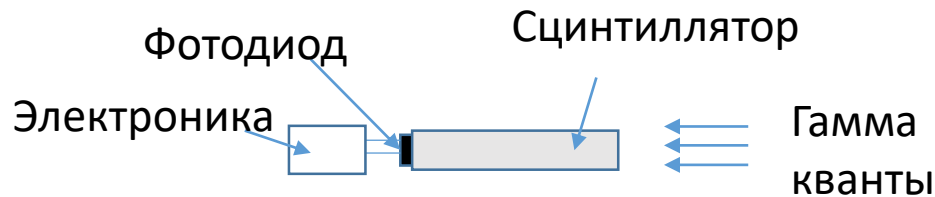
Детектор для ЛИУ-20

- Выбранное решение: использовать тяжелый сцинтиллятор
+ кремниевый PIN фотодиод (*другие фотоприемники не обеспечивают необходимый динамический диапазон*)
+ малошумящую электронику
+ оцифровку формы сигнала в заданном временном окне.

Детектор для ЛИУ-20

- В начале XXI в. в России производились 2 тяжелых сцинтиллятора: $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) и PbWO_4 (PWO). Световыход последнего слишком мал, поэтому выбран BGO.
- Основные свойства BGO:
 - Высокая линейность в большом диапазоне.
 - Спад сигнала чисто экспоненциальный с $t=300$ нс -> через 2 мкс вклад первого импульса $\sim 0,1\%$ и может быть учтен точнее при совместной подгонке 2 сигналами.

Классические устройства сцинтилляционных детекторов в физике высоких энергий



Фотодиод размещается непосредственно на сцинтилляторе, а электроника максимально близко к нему. Такая компоновка обеспечивает максимальную чувствительность и простую конструкцию.

• **НО:**

Данный метод применяется в детекторах:

- КМДЗ (ИЯФ СО РАН);
- КЕДР (ИЯФ СО РАН);
- BELLE;
- CMS;
- BGO-OD Experiment;
- L3;
- DAMPE BGO calorimeter;
- ...

Детектор для ЛИУ-20

- Для обеспечения координатного разрешения на площади $\sim 1/4$ кв.м надо разместить 16384 каналов регистрации (кристалл + чтение информации с него)
- Для примера, в наиболее близком по количеству каналов регистрации (11400) калориметре детектора L3 (ЦЕРН) для размещения фотодиодов и электроники используется площадь ~ 10 кв.м

Детектор для ЛИУ-20

- В калориметрах ФЭЧ длина кристаллов составляет ≥ 100 г/кв.см и почти вся энергия частиц в них поглощается.
- В рентгенографических системах нет возможности использовать такие длинные кристаллы, поэтому значительная часть излучения проходит через кристаллы и может дать взаимодействие в кремнии фотодиода.

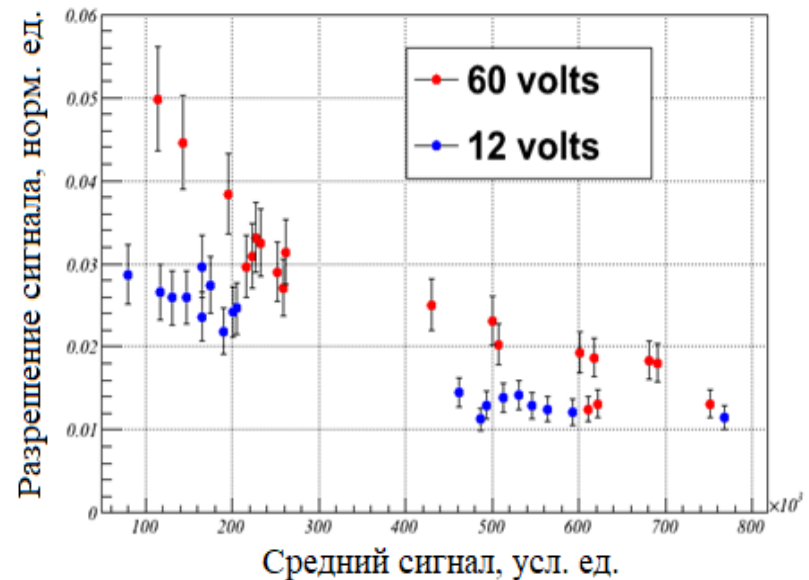
Детектор для ЛИУ-20

- Сигнал от 1 взаимодействия в кремнии порядка сигнала от взаимодействия в BGO 100 гамма квантов, поэтому имеет большие флуктуации в сравнении с сигналами от взаимодействия в сцинтилляторе.
- Моделирование показало, что вклад в энергетическое разрешение взаимодействия в кремнии может превышать вклад взаимодействия в кристаллах ~ 2 раза.

Эффект взаимодействия в кремнии фотодиодов

Для экспериментальной проверки предположения о влиянии взаимодействия в кремнии фотодиода энергетическое разрешение измерения проводились при двух напряжениях обратного смещения на фотодиоде.

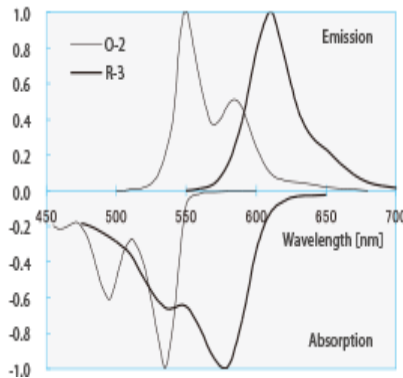
$$Signal_{\text{ФД}} \sim h_{\text{опз}} \sim \sqrt{U_{\text{ФД}}}$$



Разрешение при 60 В заметно хуже, чем при 12 В

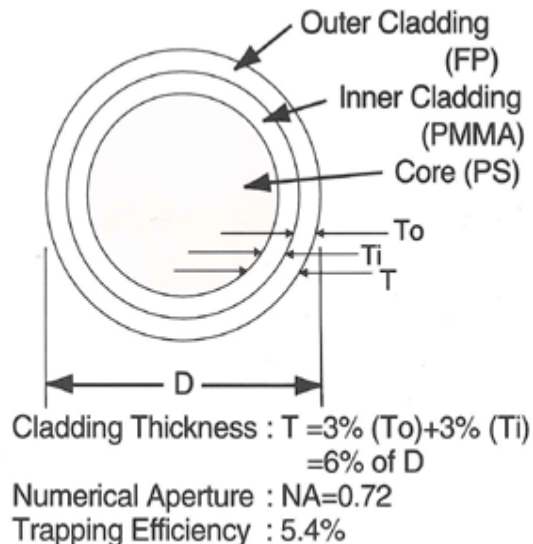
Кардинальное решение: использовать спектросмещающее (WLS) волокно

Спектр
поглощения и
высвечивания
WLS

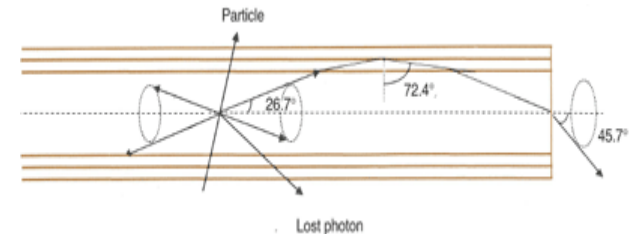


Самый большой показатель преломления у ядра (Core), самый маленький – у внешней оболочки (Outer Cladding)

Структура WLS
волокна

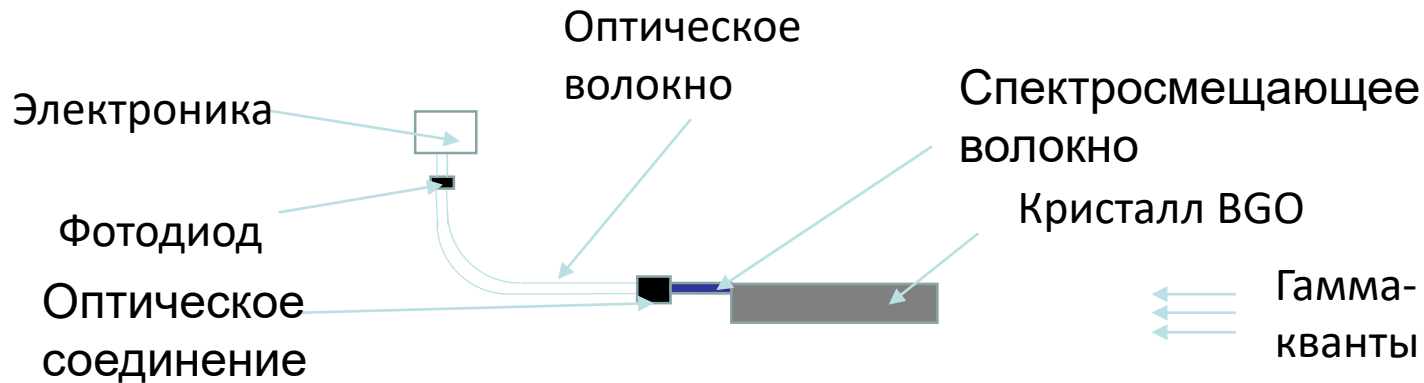


Механизм
передачи и захвата
света

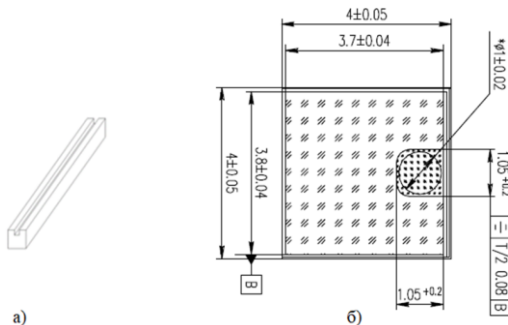


Вышедший из кристалла свет поглощается в WLS и переизлучается на большей длине волны во все стороны, часть из него захватывается в волокно на полном внутреннем отражении и передается на большое расстояние

Принципиальное устройство регистрирующего элемента (РЭ)



Спектросмещающие волокна имеют большое собственное поглощение, поэтому для передачи света на большие расстояния (несколько метров) необходимо использовать прозрачное оптическое волокно.



Волоконная оптика.

- Вклад взаимодействия в кремнии исчезает.
- Размер кристаллов не ограничен размером фотоприемников -> удалось уменьшить шаг р.э. до 4 мм, что важно для координатного разрешения
- Электроника перемещается в стандартные крейты – сильно снижаются проблемы с размером каналов и отводом тепла.
- Бесконечно упрощается термостабилизация кристаллов – в месте их расположения нет источников тепла.
- Легко заменять электронные модули по мере развития элементной базы и разработок.

Волоконная оптика.

- WLS широко используются для пластических сцинтилляторов. WLS и пластические сцинтилляторы сделаны на одинаковой основе, поэтому близки по механическим свойствам, тепловому расширению, близкий показатель преломления $n \sim 1,5$.
- У BGO совершенно другие показатель преломления $n = 2,15$, механические свойства и тепловое расширение, даже адгезия клеев к ним сильно различаются.
- Поэтому все технологические задачи пришлось решать заново.

Детектор для ЛИУ-20

- Потеря света при использовании WLS не меньше 12 раз. Частично компенсируется увеличением геометрической эффективности и уменьшением размера ФД (следовательно их емкости и шумов).
- Для обеспечения максимальной чувствительности все компоненты от кристаллов до программного обеспечения тщательно оптимизировались.

Детектор для ЛИУ-20

- Все основные решения проверялись экспериментально, для этого было создано 23 специализированных стенда, они же использовались для контроля ключевых компонент и основных этапов сборки при создании детектора.

Структура детектора

МСЭ – многоэлементный
сцинтилляционный экран



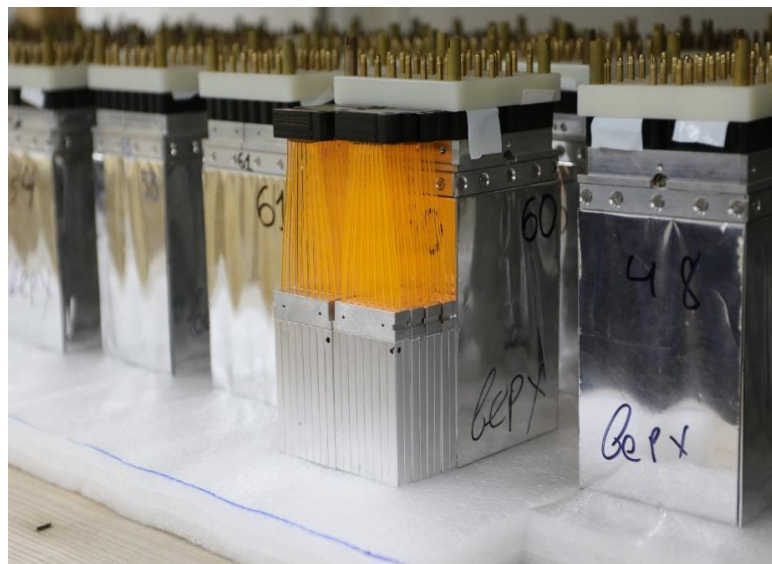
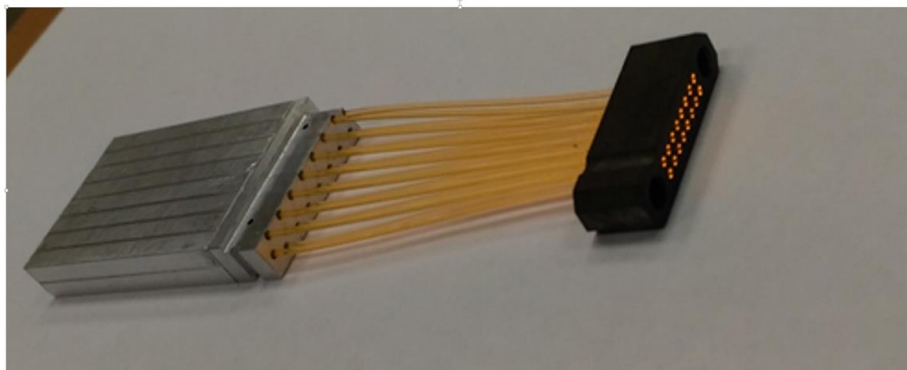
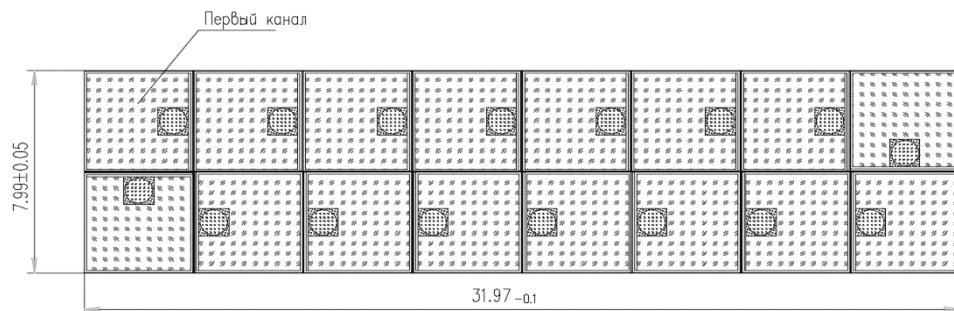
МСЭ: Кристаллы

- Оптимизация технологии изготовления позволила увеличить длину кристаллов 50 мм вместо типичной 20-30 мм, что увеличило эффективность регистрации более 1,5 раз.
- Экспериментально проверено 12 методов светосбора и выбран оптимальный.
- Конструкция модулей обеспечила минимальное количество мертвого вещества и точность позиционирования лучше 0,2 мм *(которая не влияет на координатное разрешение)*.

МСЭ: Волоконная оптика

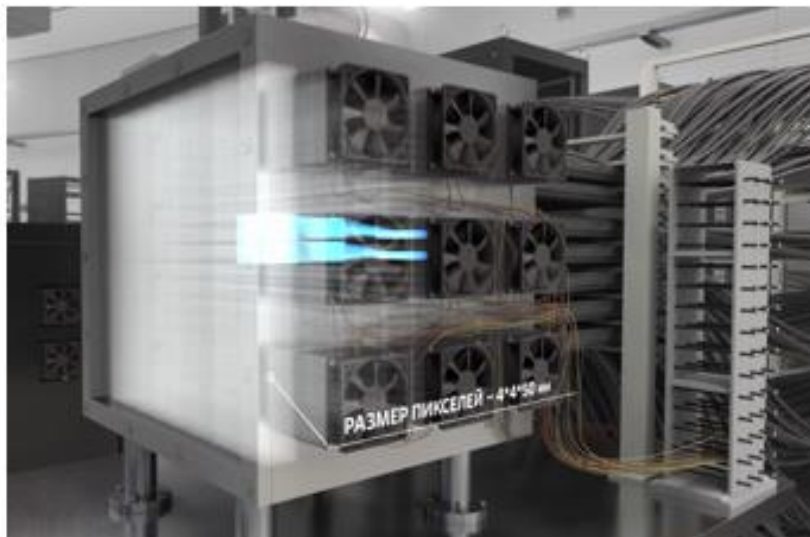
- Были экспериментально проверены все доступные спектросмещающие и прозрачные волокна и выбрана оптимальная комбинация.
- Для соединения волокон разработан компактный 16-канальный оптический разъем, обеспечивающий потери света менее 10% без использования оптического контакта (что важно для долговременной стабильности) — точность позиционирования волокон 10 мкм.

МСЭ: Конструкция



Блочная конструкция упрощает контроль и сборку
Всего 64 модуля из $16 \times 16 = 256$ кристаллов

МСЭ: Конструкция

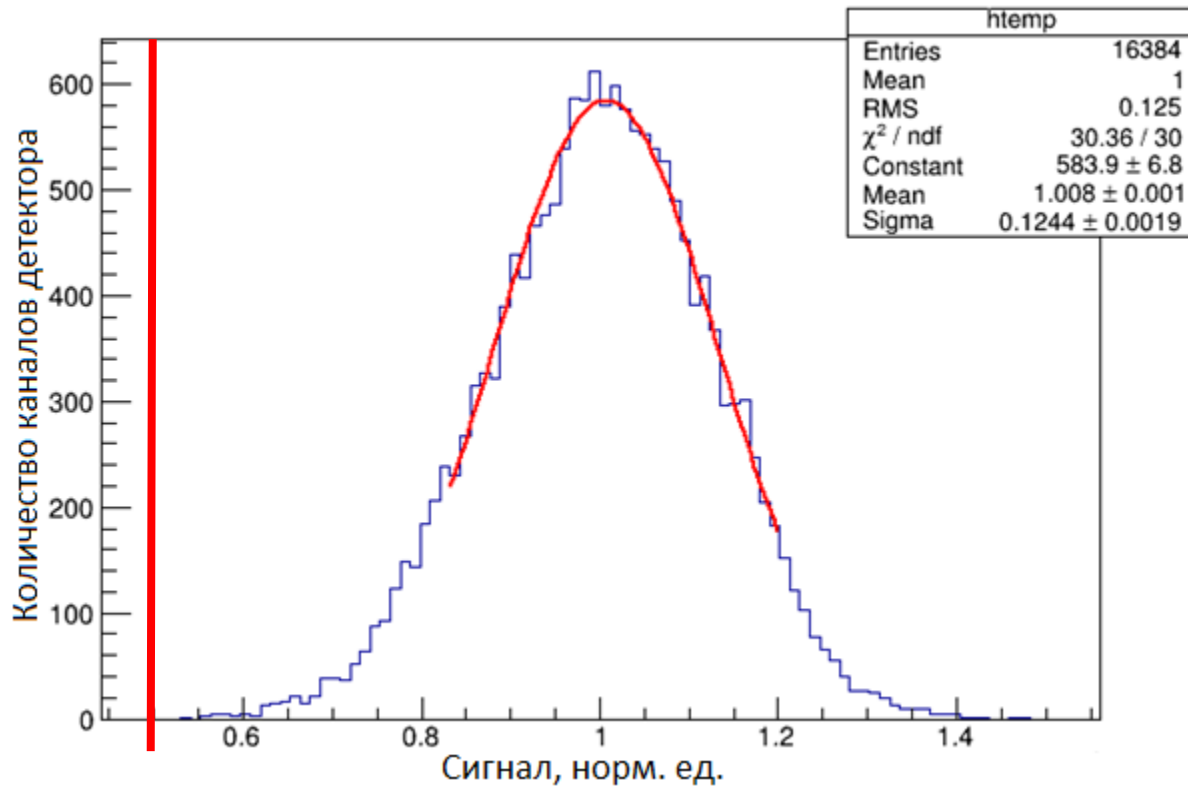


Схематическое изображение МСЭ



сборка МСЭ

МСЭ: итог

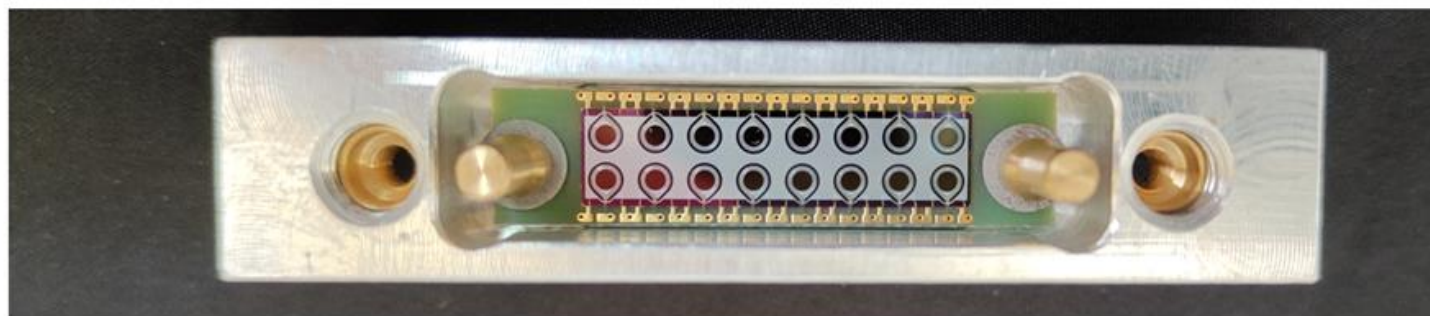
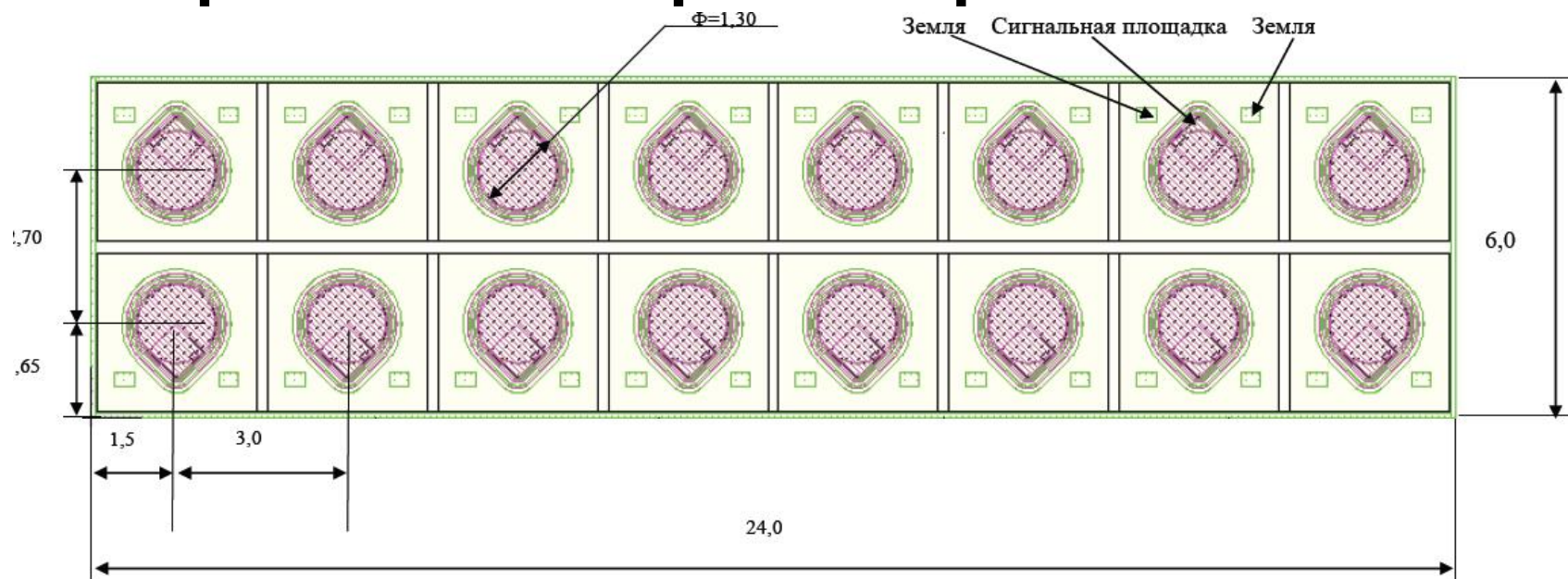


Красная линия показывает минимальную величину сигнала, при которой собственные шумы детектора не влияют на энергетическое разрешение. Все 16384 канала проверены при помощи импульсной рентгеновской трубки и имеют большой сигнал.

Измерительный Комплекс (ИК): фотоприемники

- Разработаны и внедрены в массовое производство фотодиодные линейки 2x8 чувствительных элементов.
- В результате тщательной оптимизации они превосходят мировые аналоги по важным для данной задачи параметрам (например, оптимизация покрытия увеличила на 20% чувствительность для излученного WLS света)

Кристалл фотоприемника



ИК: электроника

- Аналоговая электроника построена по методу зарядочувствительного усилителя с восстановлением формы сигнала: обеспечивает одновременно и низкие шумы и высокое быстродействие.
- Данный подход предложен и впервые реализован сотрудниками ИЯФ СО РАН.

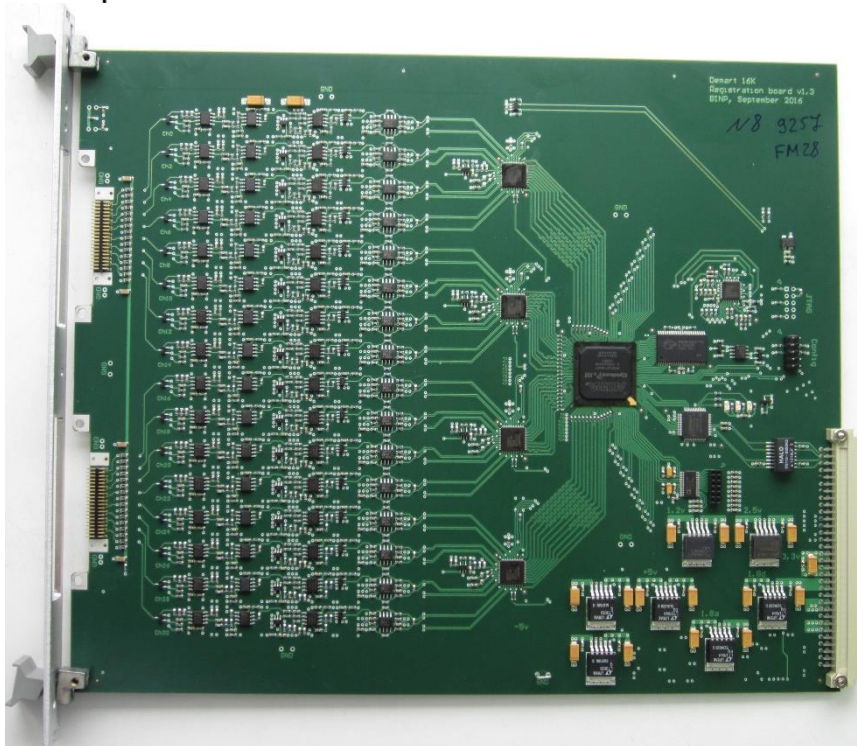
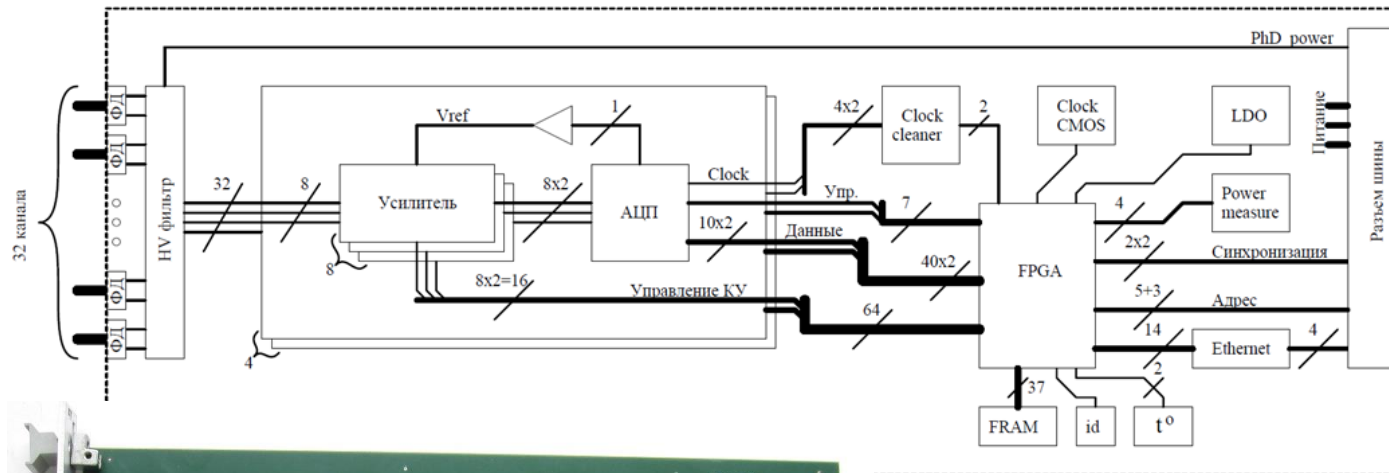
ИК: электроника

- Требуемый динамический диапазон для аналоговой электроники – на грани возможного, для АЦП – за гранью. Решение – использовать 4 коэффициента усиления ($K_{ус}$). Обеспечена длительность переходных процессов ~ 1 мкс, что позволяет заносить для каждого импульса свою карту $K_{ус}$, таким образом компенсируя изменение распределения материала в динамическом опыте.

ИК: электроника

- Оцифровка формы сигнала – самый современный метод в калориметрии.
 - Разработанный метод цифровой обработки сигналов улучшил соотношение сигнал/шум ~ 2 раза
→ уменьшение порога регистрации сигналов.
 - Восстанавливать с точностью 1,5% амплитуды сигналов с превышением шкалы АЦП до 3 раз
→ увеличение динамического диапазона.
 - Обрабатывать различающиеся по амплитуде в сотни раз последовательные импульсы
→ проводить опыты с большим изменением во времени плотности исследуемого объекта.

ИК: электроника

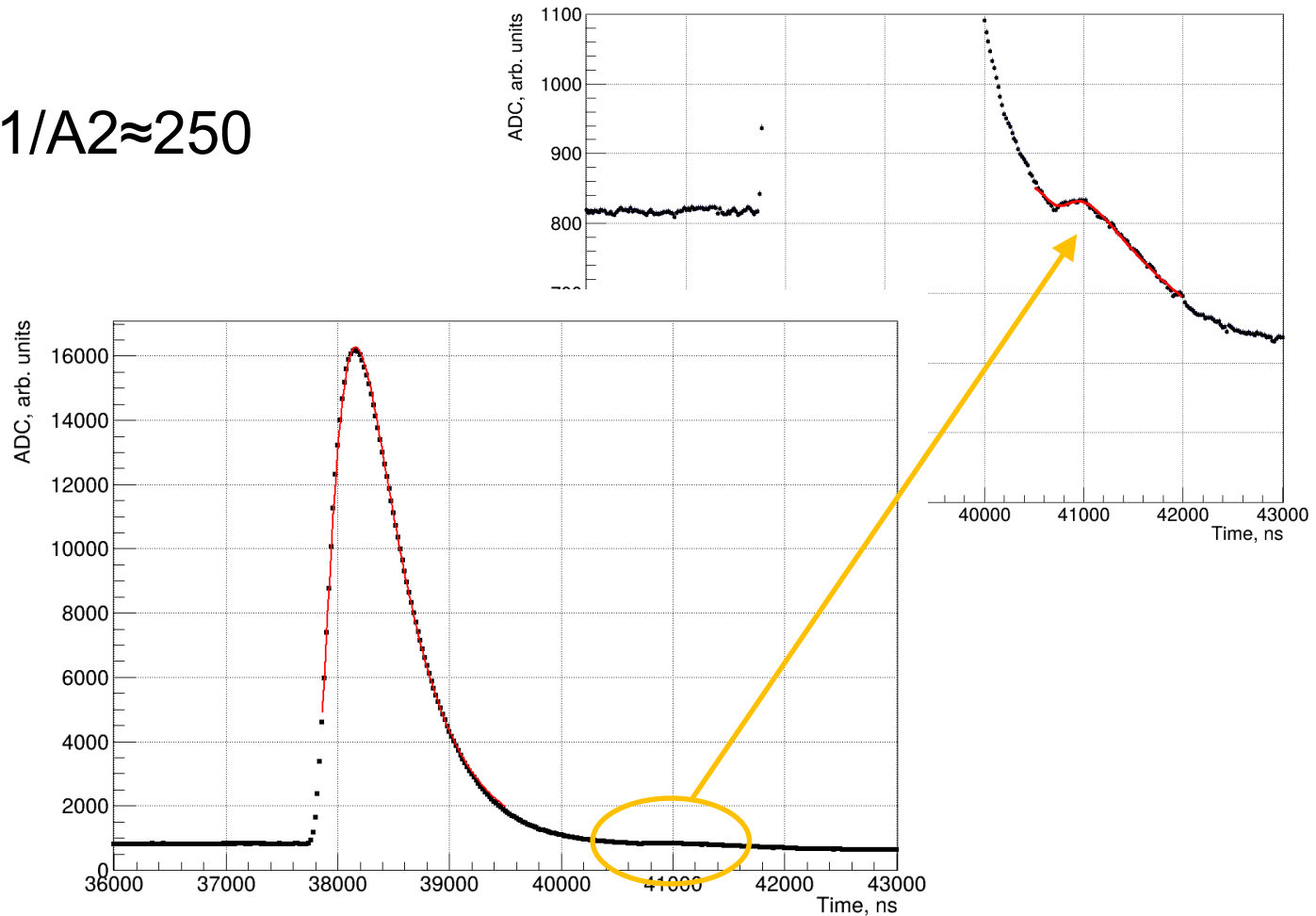


Блок схема платы регистрации

Всего 512 плат регистрации
в 6 стойках

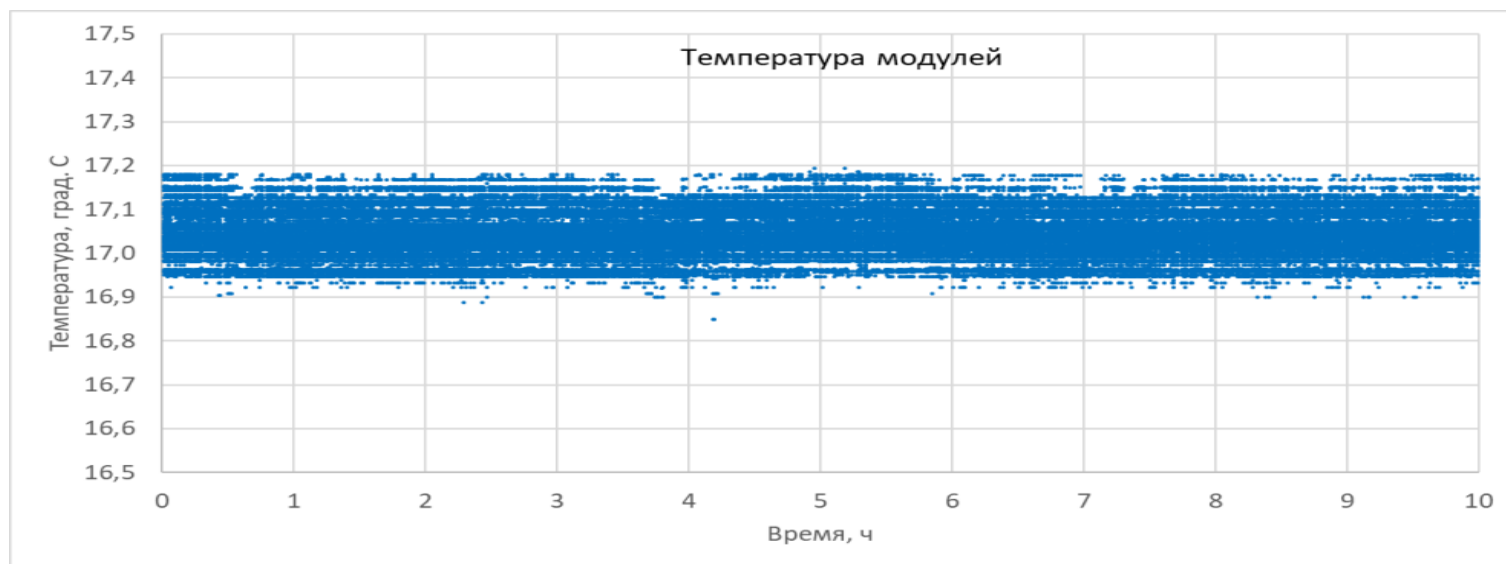
Измерение малых амплитуд сигналов на фоне больших

$$A1/A2 \approx 250$$

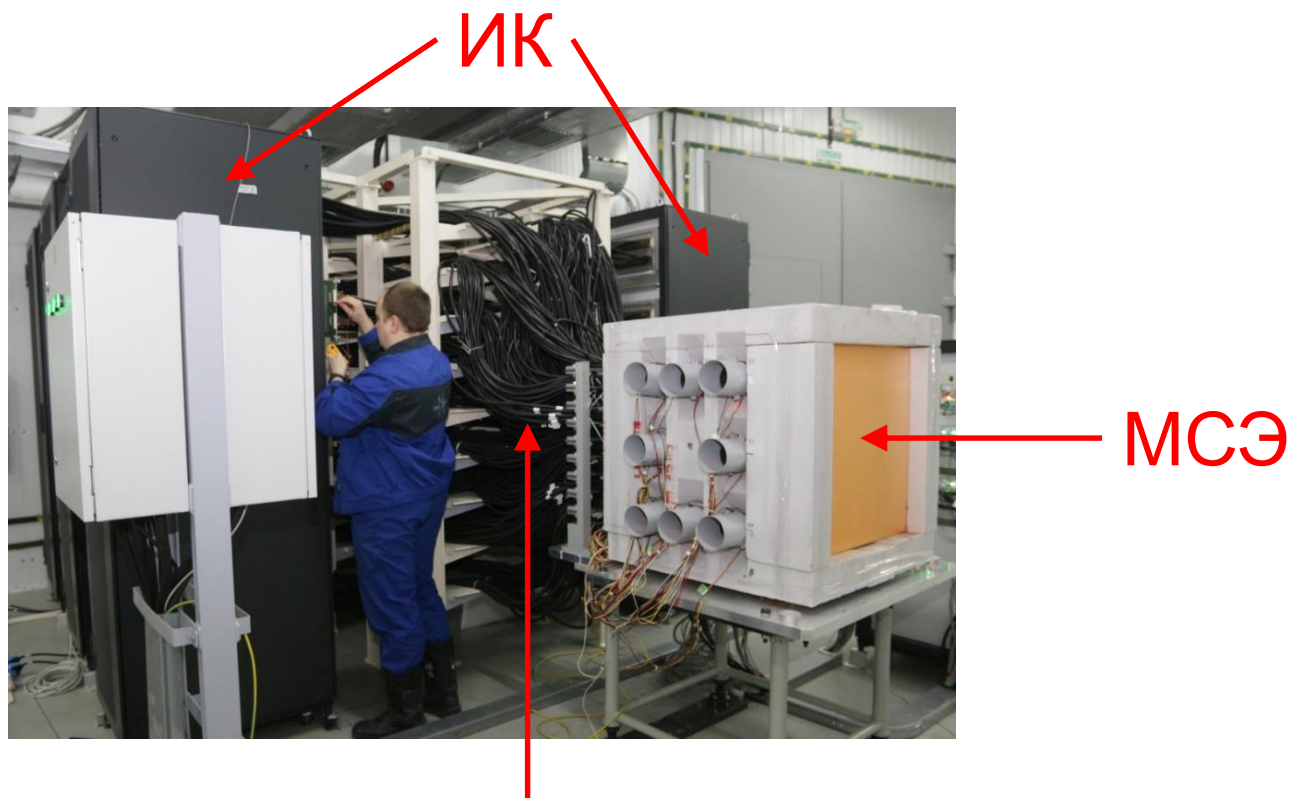


Система термостабилизации

- Световыход кристаллов ВГО имеет сильную температурную зависимость $-1,5\%/^\circ\text{C}$ $\rightarrow$ надо обеспечить долговременную стабильность температуры $\ll 1$ градуса

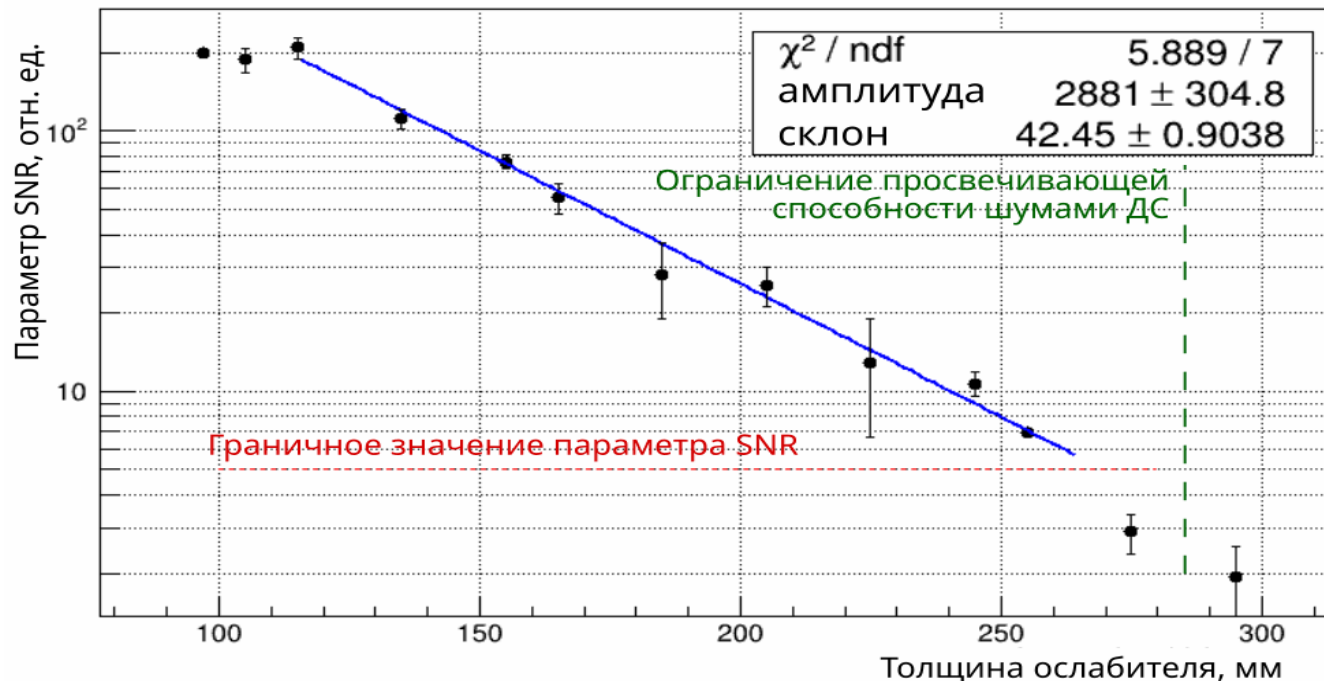


Система регистрации на рабочем месте



1024 оптических кабеля

ИТОГ



Зависимость параметра SNR от толщины ослабления пучка, аппроксимированная экспоненциальной функцией. Красной прерывистой линией показано граничное значение параметра SNR, равное 5, при котором возможна регистрация сигнала. Показанное зеленым пунктиром влияние собственных шумов ДС не влияет на просвечивающую способность. Наклон экспоненты в 2 раза больше коэффициента ослабления потока, следовательно $\text{SNR} \sim \sqrt{N\gamma}$ и имеет чисто статистический характер.

Выводы

- Впервые в мире для импульсной рентгенографии тяжелых объектов создана система регистрации, которая не ограничивает просвечивающую способность. Толщины исследуемых объектов ограничены только статистикой гамма квантов и физикой их взаимодействия с веществом.
- Получены рекордные предельное разрешение и диапазон регистрируемых сигналов, соответствующие параметрам лучшего в мире кристаллического калориметра детектора CMS (БАК, ЦЕРН).

Выводы

- В конце 2019 года система регистрации успешно прошла приемочные испытания и с ее помощью проводятся различные эксперименты на ЛИУ-20.
- Удалось просветить объекты с большими толщинами, ранее недоступные для исследования в динамике.
- Академик Г.Н. Рыкованов:
«Этот комплекс, который мы создали вместе с Институтом ядерной физики, – значительный шаг вперед по сравнению с теми рентгенографическими комплексами, которые мы и ВНИИЭФ использовали на протяжении всей деятельности. По характеристикам он существенно продвигает нас в область больших оптических толщин.»

Выводы

- Данная работа является результатом тесного плодотворного сотрудничества Российской Академии Наук и Госкорпорации «Росатом». От Академии наук в работе принимали участие сотрудники Института Ядерной Физики имени Г.И. Будкера Сибирского Отделения РАН, от Госкорпорации «Росатом» – сотрудники Российского Федерального Ядерного Центра – Всероссийского Научно-Исследовательского Института Технической Физики имени академика Е.И. Забабахина.

Выводы

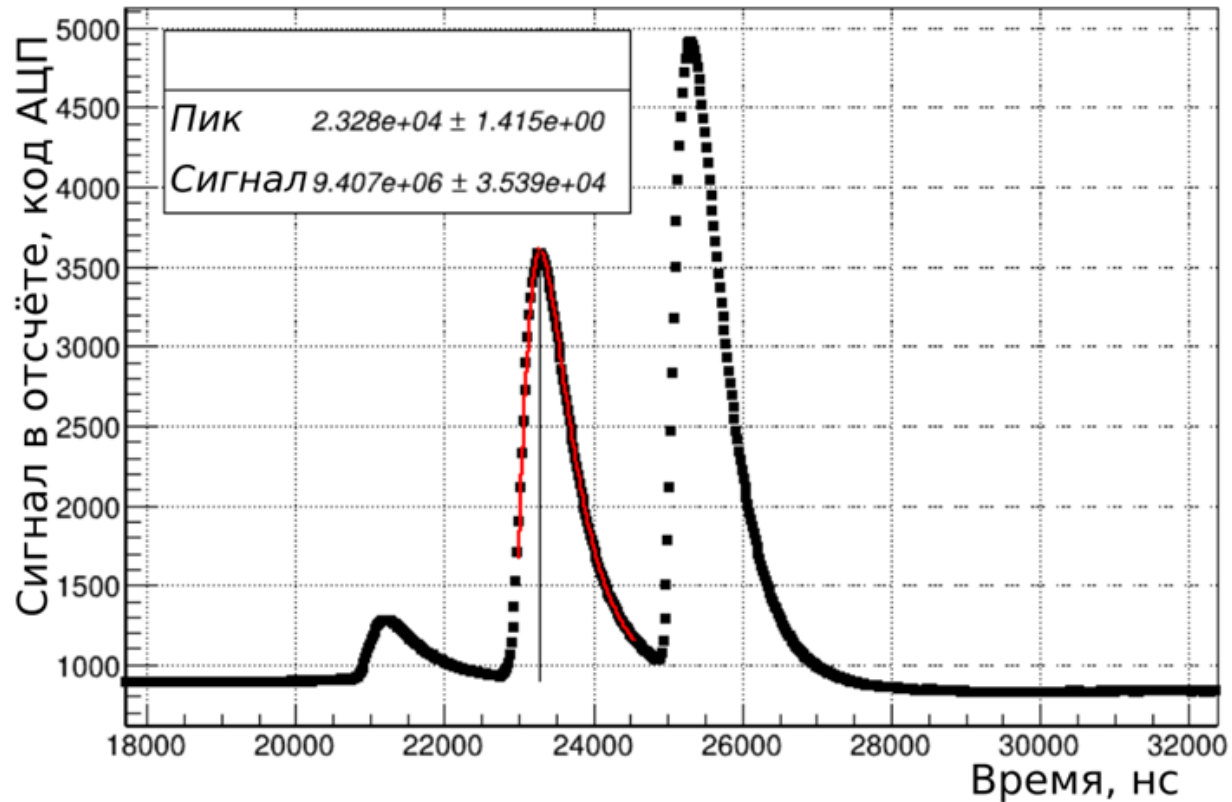
- В разработке и реализации проекта участвовало более 50 исследователей и конструкторов ИЯФ СО РАН и РФЯЦ ВНИИТФ, а еще неоценимый вклад внесли инженеры, лаборанты, рабочие...
Успешное выполнение работы является плодом напряженного труда всего коллектива и нацеленности всех участников на получение наилучшего результата.
Задачу невозможно было решить без синергии компетенций сотрудников ИЯФ СО РАН и РФЯЦ ВНИИТФ.

Вместо заключения

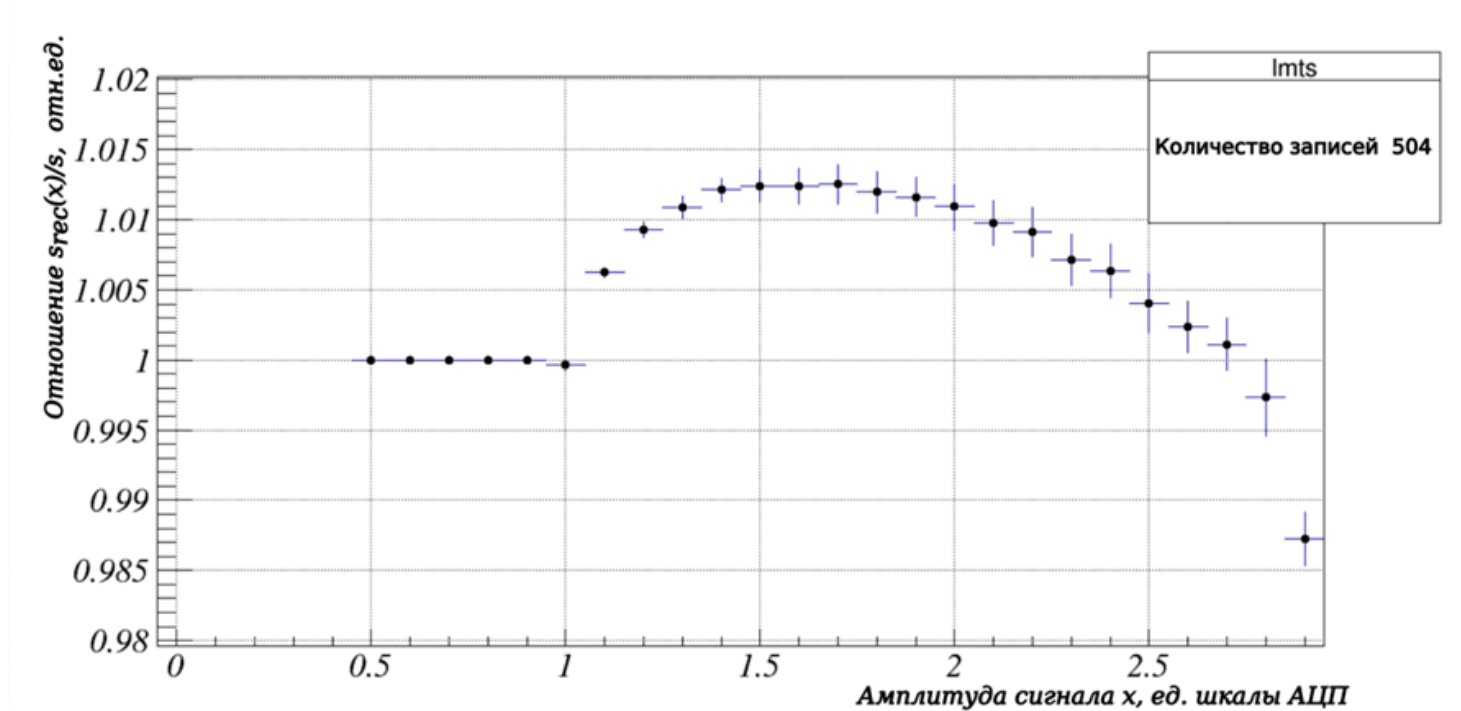
- Сейчас реализуется второй этап создания комплекса импульсной томографии, в результате будет 9 ракурсов просвечивания и, соответственно, 9 станций регистрации.
- Это позволит изучать в динамике трехмерное распределение вещества в тяжелых объектах.
- Полное количество каналов регистрации составит $9 \times 16384 = 147456$. Это будет самый большой (по количеству каналов) кристаллический калориметр в мире (сейчас лидер CMS ~ 76000).

Спасибо за внимание!

Пример регистрации 3 импульсов с интервалом ~ 2 мкс

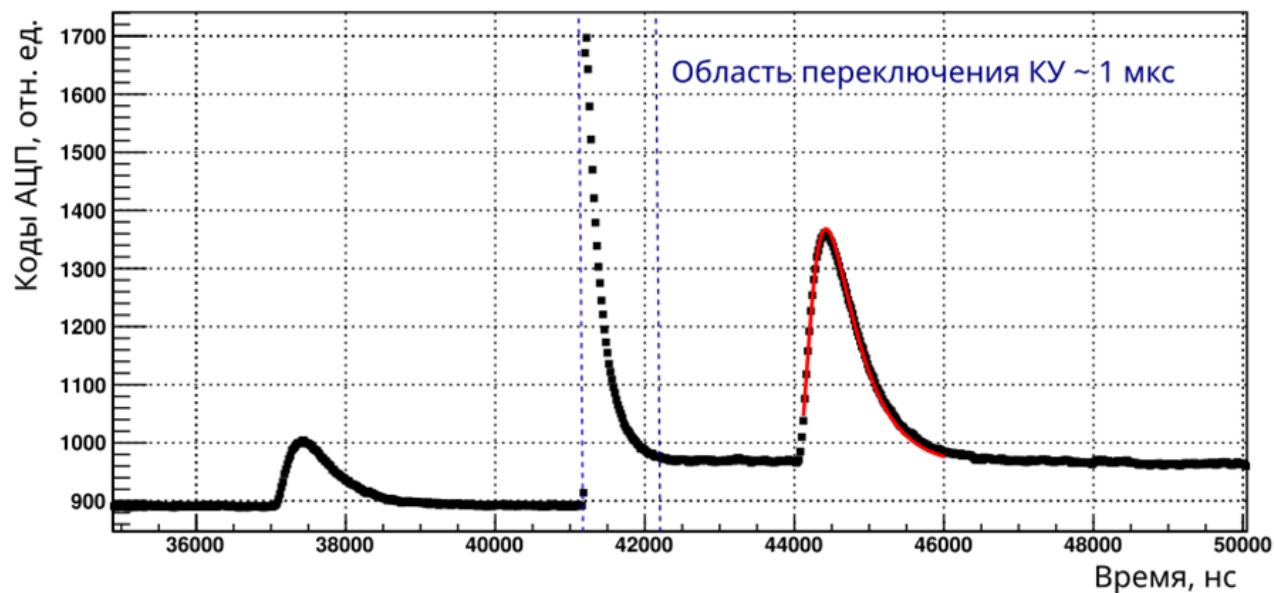


Восстановление амплитуды зашкаленных сигналов



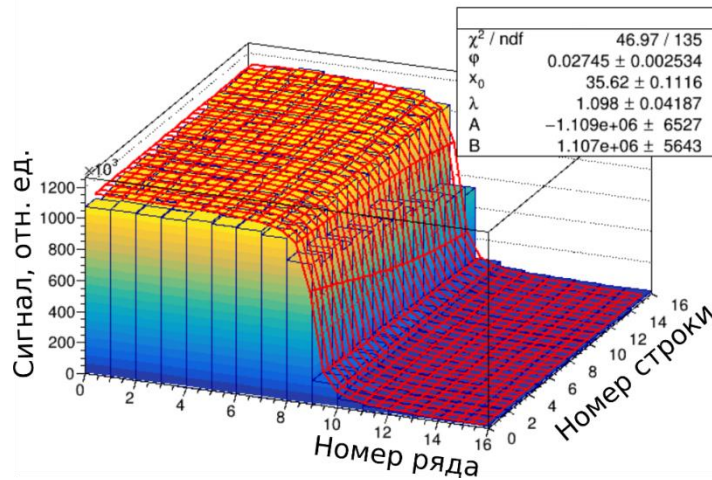
Отношение величины восстановленного сигнала к величине незашкаленного сигнала в зависимости от степени зашкаливания, выраженной в отношении амплитуды сигнала к максимуму шкалы АЦП

Перестройка Ку

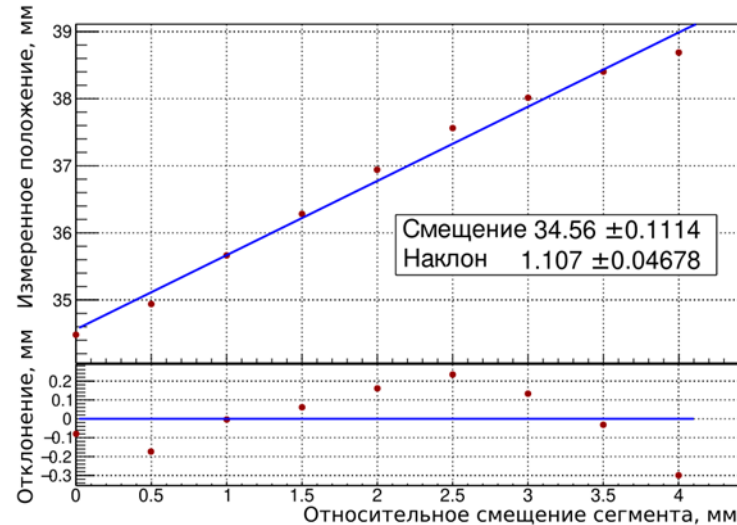


Пример регистрации 2 импульсов
гамма-излучения с переключением
коэффициентов усиления между ними

Координатное разрешение

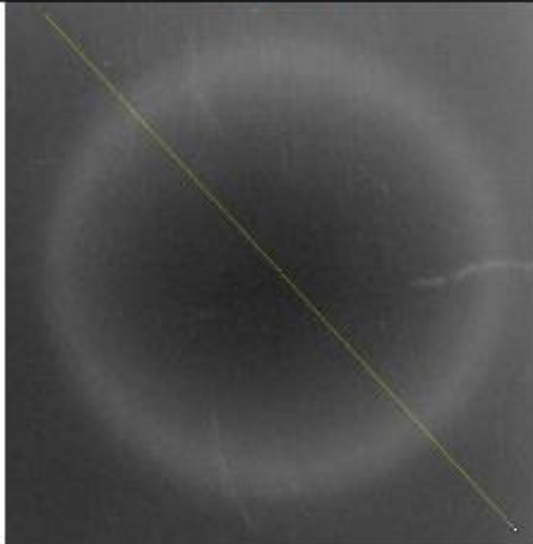
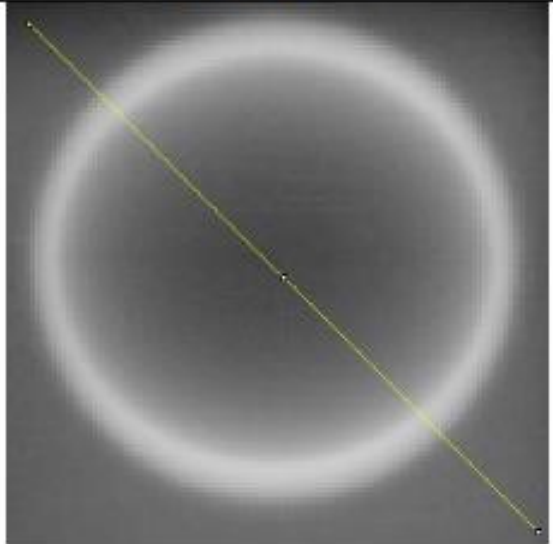
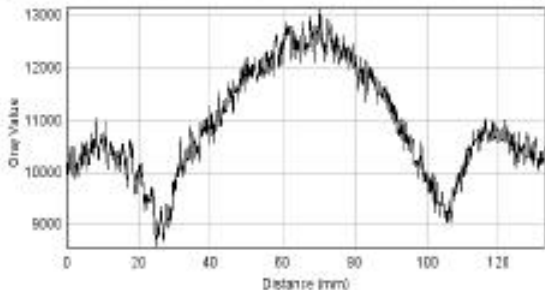
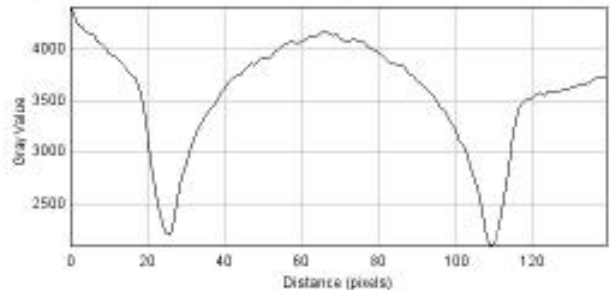


Детектор частично перекрывался вольфрамовым сегментом, который перемещался в шагом 0,5 мм
Размытие границы согласуется с моделированием и определяется физическими процессами



зависимость восстановленной координаты положения края сегмента от относительной координаты расположения самого сегмента
отличие наклона от 1.0 соответствует проекционному соотношению в опыте

Сравнение с ФЭЗ

Регистратор, Расстояние, К _ж	ФЭЗ, 1м, К _ж = 1,2	ДС, 22м, К _ж = 5
Изображения тестового объекта при ослабителе после коллиматора 140 мм стали для ФЭЗ, и 160 мм стали для ДС		
Распределение величины сигнала вдоль линии среза		

Рентгенограмма объекта ФЭЗ

описанный детектор (ДС)